

Optimización del acondicionamiento sísmico en puentes mediante el aislamiento en la base del tablero

CASCÓN PORRES, R.; GÓMEZ SEDANO, B.; ALARCÓN ÁLVAREZ, E.

Departamento de Mecánica Estructural y Construcciones Industriales. E.T.S.I.I., U.P.M., c/ José Gutiérrez Abascal, 2. 28006- Madrid

CASCÓN PORRES, R.

Departamento de Mecánica Industrial. E.U.I.T.I., U.P.M. Ronda de Valencia, 3. 28012- Madrid

e-mail: saeo@euiti.upm.es

Resumen

Una solución para conseguir minimizar los daños que los terremotos causan en los puentes consiste en el aislamiento sísmico en la base, utilizando apoyos deslizantes entre pilas y tablero que transmitan únicamente las cargas verticales, mientras que los esfuerzos horizontales son transmitidos por unos dispositivos especiales que proporcionan flexibilidad horizontal, fuerzas de reacción y disipación de energía. En este trabajo se desarrolla un método para definir cuales serían las características ideales que deberían tener esos dispositivos de aislamiento para conseguir que las fuerzas horizontales transmitidas a las pilas sean inferiores a su límite elástico, minimizando los desplazamientos permitidos del tablero, y consiguiendo idénticas deformaciones en todos los puntos de la estructura en cada momento. Este método se desarrollará para todo tipo de puentes y se particularizará para tipos propuestos en los estudios realizados en la elaboración del Eurocódigo Sísmico analizándose las variables que intervienen, y las respuestas dinámicas esperadas.

1. Introducción

La filosofía de aislamiento en puentes consiste en diferenciar los elementos que transmiten las cargas verticales a las pilas (aparatos de apoyo), de los elementos que transmiten las fuerzas horizontales y conseguir así que esas cargas horizontales sólo afecten a la pila a través del dispositivo instalado. Para ello se coloca una superficie de bajo rozamiento, como podría ser la pareja teflón-acero inoxidable, para permitir el deslizamiento del tablero sobre la pila en el momento de producirse el sismo. Solo cuando el deslizamiento se produce entrarían en funcionamiento unos dispositivos especiales que transmitirán la fuerza horizontal a la pila.

Este aislamiento perfecto debe consistir en:

1- Igualdad de desplazamientos de todos los puntos del tablero:

Al producirse esta condición, el movimiento de todo el tablero se puede suponer como el de un oscilador con un único grado de libertad, cuya masa fuese la total del tablero y la rigidez y amortiguamiento que unen la masa al suelo sería la resultante del efecto total que ejercerían las pilas, estribos y dispositivos de aislamiento.

Para ello debe conseguirse que las aceleraciones provocadas por las pilas en cada punto del tablero sean también iguales. Por ello la fuerza (F_i) que cada pila ejerce en su coronación sobre el tablero debe ser proporcional a la masa que soporta (masa tributaria, m_i). Debe cumplirse:

$$F_0/m_0 = F_f/m_f = F_1/m_1 = F_2/m_2 = \dots = F_i/m_i = F/M = \text{aceleración (Constante)} \quad [1]$$

en donde el subíndice indica la posición de la pila, correspondiendo "0" y "f" a los estribos y sin subíndice la suma de las fuerzas de las pilas y la masa total.

Si se supone la pila como un resorte de rigidez k la expresión [1] quedaría:

$$k_0 x_0/m_0 = k_1 x_1/m_1 = \dots = k_i x_i/m_i = KX/M \Rightarrow k_0/m_0 = k_1/m_1 = \dots = k_i/m_i = K/M \quad [2]$$

puesto que los desplazamientos (x_i) deben ser iguales para todos los puntos.

Para que las aceleraciones que provoca el amortiguamiento en cada pila sean iguales, los coeficientes (ξ_i) de cada una de las pilas deben ser idénticos:

$$\xi_0 = \xi_f = \xi_1 = \xi_2 = \dots = \xi_i \quad [3]$$

2-Limitación de la fuerza máxima:

Para que no se alcance la plastificación en ninguna pila, el dispositivo de aislamiento debe soportar una fuerza máxima, y cuando se alcance, permitir el deslizamiento del tablero sobre la pila sin que aumente la fuerza transmitida. Cada pila tendrá una fuerza límite y sobre su masa tributaria existirá una aceleración límite:

$$a_{\text{lim},i} = F_{\text{lim},i} / m_i \quad [4]$$

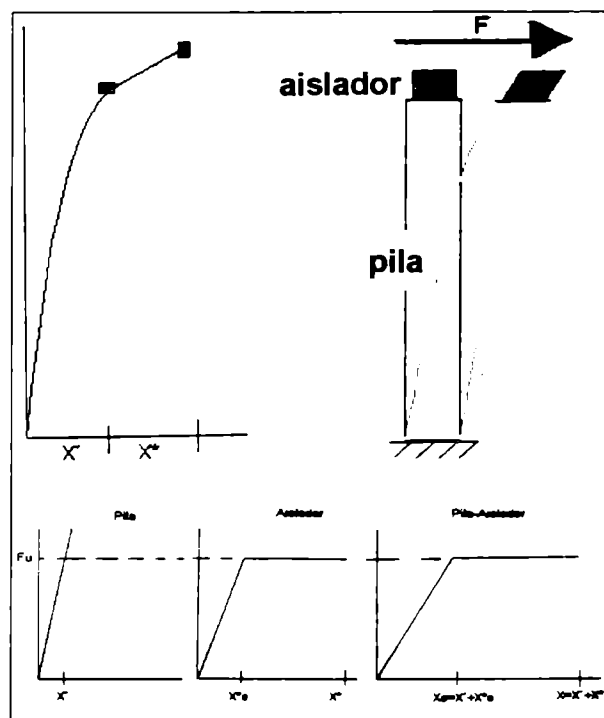
Ya que todas las masas deben tener aceleraciones iguales, la aceleración máxima que podrá existir en el tablero será la mínima de las posibles en todas las pilas.

$$a_{\text{lim,tablero}} = \text{Min} (F_{\text{lim},i} / m_i) \quad (\text{para todo valor de } i) \quad [5]$$

3- Limitación de desplazamientos del tablero

Si, mediante el aislamiento adecuado, se puede hacer la suposición de que el puente se comporta como un sólido rígido oscilando con un grado de libertad, y se conoce el coeficiente de amortiguamiento y su rigidez, se podrá entonces estimar su desplazamiento máximo utilizando el espectro elástico de respuesta, conociendo la aceleración sísmica de cálculo de la zona donde se sitúe el puente. La rigidez y amortiguamiento, dependerán a su vez del máximo desplazamiento del tablero.

2. Rigidez y amortiguamiento del conjunto pila-aislador



Las pilas tendrán en todo momento comportamiento elástico perfecto (el aislamiento evitará la plastificación de cualquier pila). El dispositivo de aislamiento situado sobre la pila se supondrá que tiene un comportamiento fuerza-deformación elastoplástico perfecto (EPP) (figura 1). Se indica con superíndice “*” las características del aislador, con “’” las de la pila, y sin superíndice las características del conjunto pila-aislador. El subíndice “e” indica el límite elástico. La ligadura entre el tablero y el suelo que supondría este conjunto, se podría sustituir por un resorte y un amortiguador viscoso con las siguientes características:

- Rigidez: $k = F/X = F/(x' + x^*)$

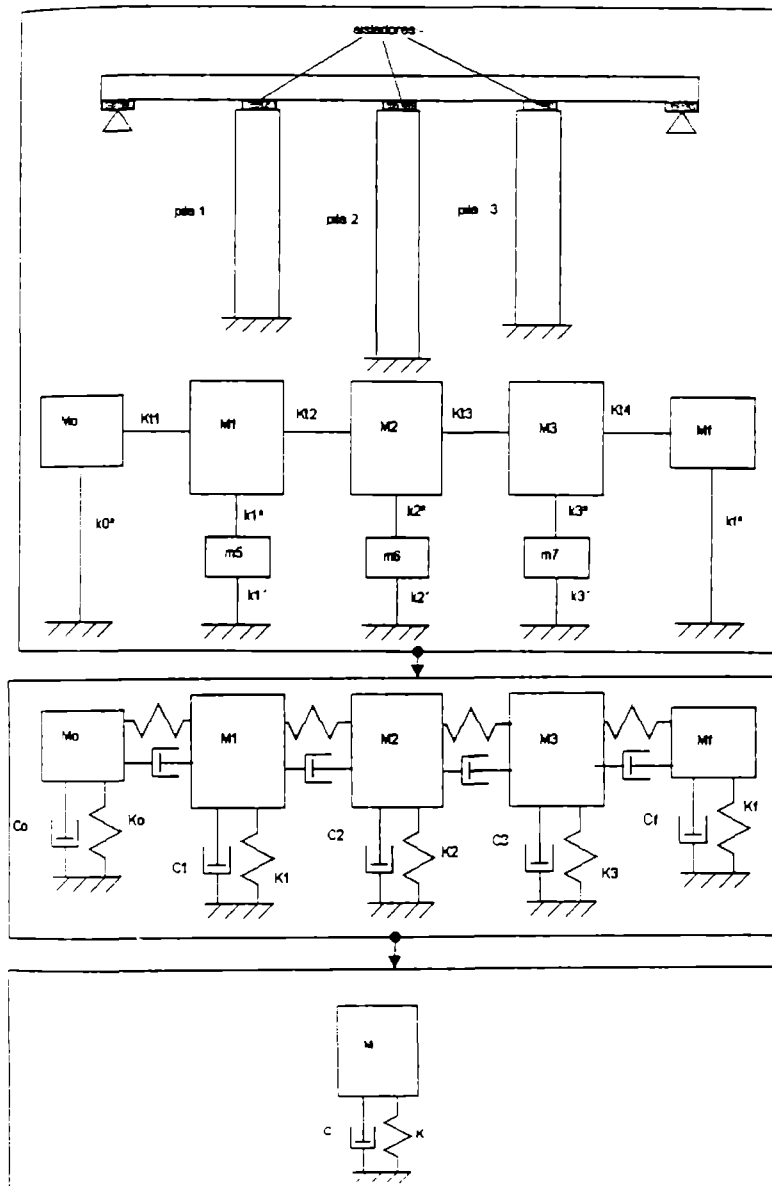
- Amortiguamiento: $\xi = \frac{2 \left(1 - \frac{1}{\mu} \right)}{\pi}$

Fig. 1. Comportamiento conjunto pila-aislador

siendo μ la demanda de ductilidad:
$$\mu = \frac{X}{X_c} = \frac{x' + x^*}{x' + x_c^*} \quad [6]$$

Los estribos se pueden considerar como pilas de rigidez infinita, ($x' = 0$).

3. Modelo del puente con estos dispositivos de aislamiento



El modelo simplificado de un puente se indica en la figura 2a siendo m_0, m_1, m_2, m_3 y m_f las masas del tablero que se supone soporta cada una de las pilas o estribos, y m_4, m_5, m_6 las masas de las pilas. Despreciando la influencia de estas masas y teniendo en cuenta que el comportamiento conjunto de cada pila más aislador se comporta como un resorte y un amortiguador, como se ha indicado más arriba, el modelo se podría simplificar como se indica en la figura 2b. Puesto que el aislamiento está diseñado para que todos los puntos del tablero se desplacen simultáneamente, toda la masa del tablero se puede considerar como un sólido rígido y es inmediato simplificar este modelo a un oscilador de un grado de libertad (figura 2c) definido por:

Masa: $M = m_0 + m_1 + m_2 + m_3 + m_f$

Rigidez: $K = k_0 + k_1 + k_2 + k_3 + k_f$

Amortiguamiento: $\xi = \sum (\xi_i m_i) / M$

y si se cumple [3] este coeficiente es igual al de cualquier pila: $\xi = \xi_i$

Fig. 2. Modelo simplificado del puente con aislamiento

4. Determinación de las características de los aisladores para conseguir que no se alcance un desplazamiento máximo del tablero ante un terremoto.

Se pretende aislar un puente del que se conocen la aceleración sísmica de cálculo (a_c), la rigidez de cada una de las pilas (k_1', k_2', \dots, k_i'), la fuerza límite en el extremo de las pilas que provocan su comportamiento plástico ($F_{lim.1}, F_{lim.2}, \dots, F_{lim.i}$), el desplazamiento máximo admisible del tablero (X_{max}) y el coeficiente de seguridad (β) aplicable sobre la fuerza límite de la pila para asegurar su comportamiento elástico.

Para ello se deben calcular las características necesarias de cada uno de los aisladores a instalar (uno sobre cada pila o estribo) de comportamiento elastoplástico perfecto, es decir, su desplazamiento máximo admisible (x_0^* , x_f^* , x_1^* , ..., x_i^*), la fuerza última de cada aislador: ($F_{u.0}^*$, $F_{u.f}^*$, $F_{u.1}^*$, ..., $F_{u.i}^*$) y el desplazamiento elástico de cada aislador ($x_{e.0}^*$, $x_{e.f}^*$, $x_{e.1}^*$, ..., $x_{e.i}^*$)

Determinación de la fuerza máxima:

Según [5] la aceleración máxima que se puede aplicar sobre el tablero valdrá:

$$a_{\text{lim.tablero}} = \text{Min} (\beta \cdot F_{\text{lim},i} / m_i) \quad (\text{para todo valor de } i) \quad [7]$$

La fuerza última en cada dispositivo de aislamiento sería:

$$F_{u,i}^* = m_i \cdot a_{\text{max}} \quad [8]$$

Determinación de la máxima deformación del aislador

Si se conoce la máxima fuerza que soportará la pila en su extremo se puede calcular la deformación máxima que experimentará la pila sola:

$$x_i' = F_{u,i}^* / k_i' \quad [9]$$

Y como se conoce la deformación máxima del tablero:

$$x_i^* = X_{\text{max}} - x_i' \quad [10]$$

Determinación de la deformación elástica del aislador

Se debe conseguir que el amortiguamiento existente en el puente sea el que provoque ese desplazamiento máximo X_{max} . Puesto que la estructura se comportará con un solo grado de libertad la aceleración máxima que alcanzara se puede calcular según el espectro elástico de respuesta propuesto por el Eurocódigo, tomándose el correspondiente a estructuras con periodos altos, como es el caso habitual de los puentes, que da una aceleración máxima de la estructura:

$$\text{Para periodos altos: } (T > T_1): \quad a_{\text{max}} = \eta 2,5 (T_1/T) a_c \quad [11]$$

con $T_1 = 0,6$ s para suelos tipo medio

$$\eta \text{ depende del amortiguamiento y vale: } \eta = \sqrt{\frac{0,05}{\xi}} \quad [12]$$

Sabiendo que $(T = 2\pi / \omega = 2\pi \sqrt{\frac{M}{K}})$ la expresión de la aceleración sería:

$$a_{\text{max}} = \sqrt{\frac{0,05}{\xi}} \cdot S \cdot 2,5 \cdot \frac{T_1}{2\pi} \sqrt{\frac{M}{K}} \cdot a_c \quad [13]$$

La aceleración máxima se conoce por [7], y puesto que se debe cumplir [2], el cociente M/K se puede hallar a partir de la rigidez efectiva de una pila cualquiera:

$$M/k = m_i/k_i = m_i \cdot X_{\text{max}} / F_{u,i} \quad [14]$$

El coeficiente de amortiguamiento necesario se puede calcular a partir de [13]:

$$\xi = 0,05 M/K [S \cdot 2,5 \cdot (T_1/2\pi) \cdot (a_c/a_{\text{max}})]^2 \quad [15]$$

En todas las pilas existirá este amortiguamiento y se podrá hallar μ :

$$\mu = 2/(2 - \pi \cdot \xi) \quad [16]$$

Finalmente el desplazamiento elástico de cada uno de los aisladores será:

$$x_{e,i}' = x_e - x_i' = (X_{\text{max}}/\mu) - x_i' \quad [17]$$

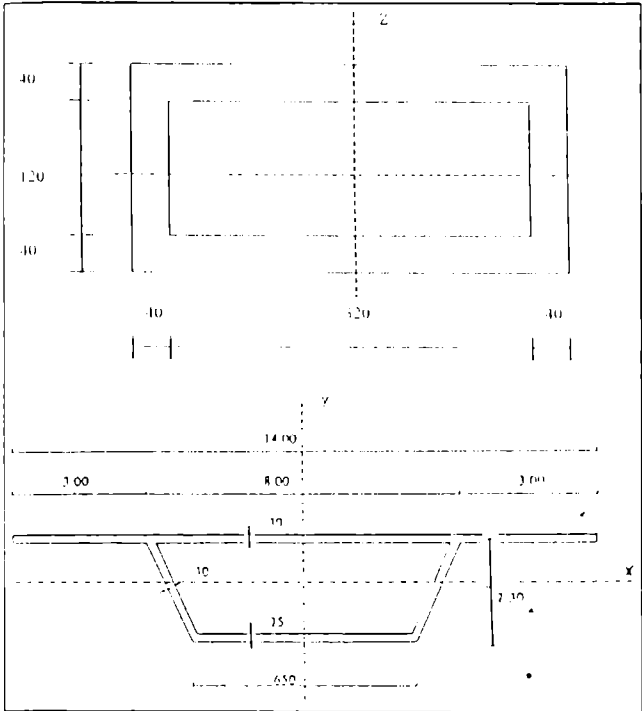


Fig. 3. Sección de pilas y tablero del puente 213

En la tabla 1 se muestra la resolución del aislamiento para un puente 213 de tres pilas de alturas 14, 7 y 21 m, de 50 m de separación entre pilas y longitud total del tablero de 200 m, con la sección transversal de pilas y tablero indicada en la figura 4 (con las cotas en cm) y cuantía de armadura de las pilas exteriores de 1,19 % y de 0,52% para la pila central. El desplazamiento del tablero queda limitado a un 1 % del valor de la pila más alta ($X_{\max} = 0,21$ m), excitado por un terremoto transversal al tablero cuyo pico de aceleración máxima es de 0,35 g y diseñando para que la fuerza máxima en las pilas alcance el 85 % del valor que provoca la rotula plástica en la más desfavorable.

Tabla 1: Resumen del aislamiento del puente tipo 213

	estribo inic	pila 1	pila 2	Pila 3	Estribo final	Total
Fuerza máxima (N)	1,18E+06	2,36E+06	2,36E+06	2,36E+06	1,18E+06	9,45E+06
Deformax aisl. (m)	2,10E-01	1,84E-01	2,05E-01	1,23E-01	2,10E-01	
Deformax elast. aisl. (m)	1,87E-01	1,61E-01	1,82E-01	1,00E-01	1,87E-01	
Desplaz. Tablero (m) =2,10E-01 Periodo(s)=1,91 Amortiguamiento =7,11%						

5. Minimización del desplazamiento del tablero

El valor del desplazamiento máximo del tablero sería conveniente reducirlo tanto como permitan las posibilidades de los aisladores. Si un dispositivo de aislamiento tiene una capacidad de ductilidad límite (μ_c) la ductilidad máxima que podría alcanzarse en el conjunto pila-aislador sería:

$$\mu = \frac{X_{\max}}{x' + x_c^*} = \frac{X_{\max}}{x' + \frac{x^*}{\mu_c^*}} \tag{18}$$

El máximo amortiguamiento que podría alcanzarse en la pila "i" sería:

$$\xi_i = \frac{2}{\pi} \left(1 - \frac{1}{\mu} \right) = \frac{2}{\pi X_{\max}} \left(1 - \frac{1}{\mu_c^*} \right) (X_{\max} - x_i') \tag{19}$$

Puesto que el puente tendrá el mismo amortiguamiento en todas sus pilas, el amortiguamiento posible máximo será el menor de los hallados según [19]:

$$\xi_i = \frac{2}{\pi X_{max}} \left(1 - \frac{1}{\mu_c^*} \right) (X_{max} - \text{Max}(x_i')) \quad [20]$$

Por otra parte de la expresión [15] se puede despejar el valor de ξ :

$$\xi = \frac{M}{FX} \left(\frac{2.5a_c T_1}{2\pi} \right)^2 0.05 \quad [21]$$

en donde F es la suma de todas las fuerzas ejercidas por todas las pilas en el momento del máxima desplazamiento. Igualando (20) y (21), y despejando X_{max} :

$$X_{max} = \frac{M}{8F\pi} (2.5a_c T_1)^2 0.05 \frac{\mu_c^*}{\mu_c^* - 1} + \text{Max}[x_i'] \quad [22]$$

Para calcular las características de los aisladores necesarios, tan solo habría que seguir los pasos indicado en el apartado 4, considerando el valor hallado como el desplazamiento máximo permitido en el tablero.

En la tabla 2 se muestra la optimización del aislamiento del puente del apartado 4 suponiendo una capacidad de ductilidad de 4 en los aisladores. En dispositivos de aislamiento ya utilizados, se pueden alcanzar capacidades de hasta 10 ó 15.

Tabla 2: Resumen del aislamiento optimizado del puente tipo 213

Resumen resultados 213						
	estribo inic	Pila 1	Pila 2	Pila 3	Estribo final	total
Fuerza máxima (N)	1,18E+06	2,36E+06	2,36E+06	2,36E+06	1,18E+06	9,45E+06
Defor.max aislador (m)	1,19E-01	9,32E-02	1,14E-01	3,25E-02	1,19E-01	
Defor.elast.aislador (m)	9,47E-02	6,88E-02	9,00E-02	8,12E-03	9,47E-02	
Desplaz. Tablero (m) =1,19E-01 Periodo (seg.)=1,45E+00 Amortiguamiento =13,03%						

6. Conclusiones

Se ha desarrollado un método simplificado para calcular las características que deben tener los dispositivos de aislamiento, para conseguir que toda la estructura vibre con un único grado de libertad, se controlen las fuerzas transversales transmitidas a las pilas, minimizando los desplazamientos producidos en el tablero. Con ello se consigue una estimación sencilla de los desplazamientos del tablero y de las deformaciones de las pilas de un puente aislado con este método, al producirse un terremoto con una aceleración sísmica de cálculo establecida.

7. Referencias

- CALVI, G.M.; PAVESE, A. (1997) "Conceptual Design of Isolation Systems for Bridge Structures". Journal of Earthquake Engineering. Vol 1. N° 1. 1997
- CASCON, R. (1998) "Aconcicionamiento Sísmico de Puentes Mediante Aislamiento en Apoyos", Tesis Doctoral. E.T.S.I.I., U.P.M.
- MARIONI, A. (1994) "Development of a New Type of Energy Dissipating Device for Seismic Protection of Bridges". 10th European Conference on Earthquake Engineering.